

그린카용 자동차 전력모듈 기술 동향

울산대학교 | 김병우 · 허 진

1. 기술 개요

1.1 개념 및 정의

그린카(Green Car)는 넓은 의미에서 이산화탄소의 발생량을 감소시키는 시스템 또는 무공해(Zero Emission) 동력시스템이 장착된 차량으로 하이브리드차, 플러그인차, 수소 연료전지차, 전기차 등이 해당된다. 그린카는 기존 자동차에 비해 화석연료를 대신하여 전기에너지 사용량이 크게 증대되기 때문에, 주동력 원인 전기 동력 시스템의 고효율화가 중요하며, 이를 위한 핵심부품으로는 구동모터, 전력변환장치(컨버터, 인버터) 등을 들 수 있다. Hybrid차 및 전기차용 차세대 전력모듈은 자동차산업의 생존조건으로 부각되는 그린카의 심장부에 해당되는 전기구동시스템의 고밀

도화, 고효율화, 경량화를 위한 핵심요소부품으로 전력(DC→AC, AC→DC)을 변환하는데 이용되는 전력 반도체소자들로 조합된 모듈이다. 그린카의 국내외 기술개발 방향은 전기차에 있어서는 단일 모터 구동 시스템으로, Hybrid차에 있어서는 모터, Generator를 별도로 채용하며 전원전압을 승압하여 공급하는 시스템으로 진행되고 있다. 이에 따라 전력변환기의 구성이 달라지게 되어 아래 그림과 같이 전기차 인버터용으로는 6개의 전력스위치가 일체화된 전력모듈이 필요하며, Hybrid차용 전력모듈에 비하여 높은 전류용량이 필요하다.

Hybrid차 전력변환장치용으로는 모터, Generator용으로 각각 6개, Boost Converter용으로 2개의 전력 스위치가 필요시 되며, 전력변환장치의 소형화 및 고신

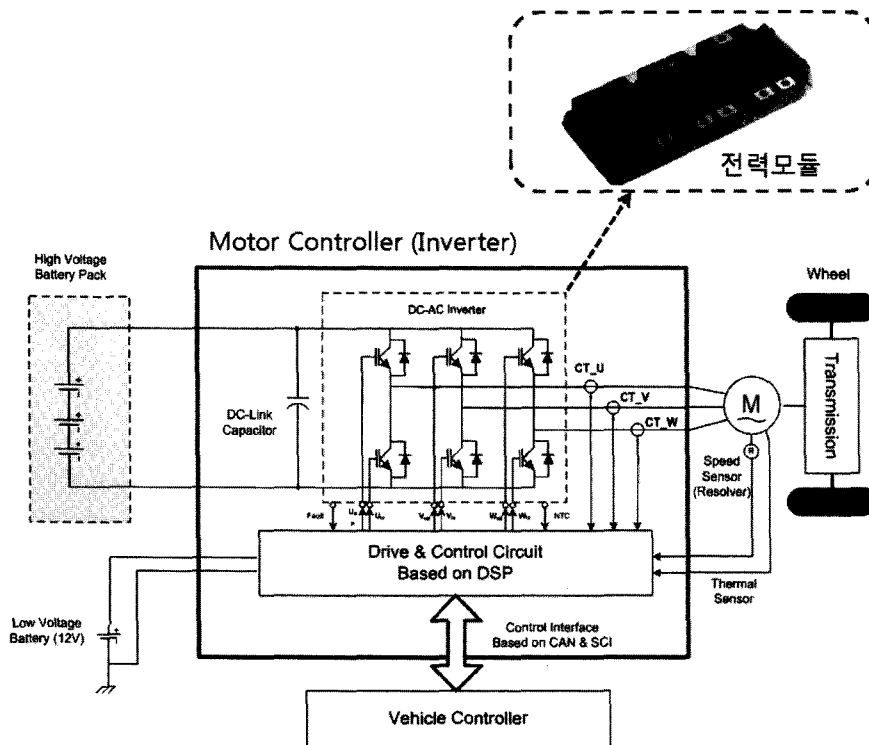


그림 1 전기차 인버터 및 전력모듈의 구성도

HEV용 전력모듈(14스위치 일체형)

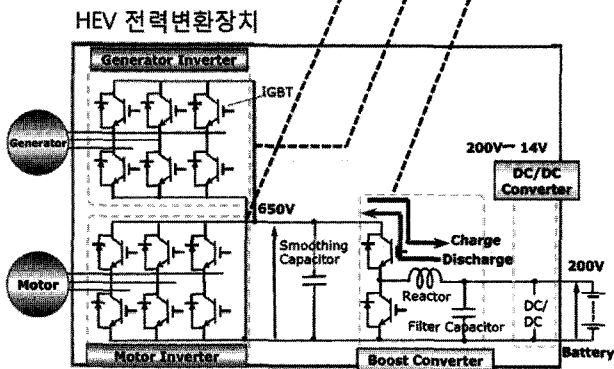


그림 2 Hybrid 자동차 전력변환장치 및 전력모듈의 구성도

뢰성화를 위하여 국외에서는 이러한 14개의 전력스위치를 하나의 패키지에 일체화하는 방향으로 기술이 발전되고 있다.

전력모듈은 전력변환장치(컨버터, 인버터) 재료비의 50~60%를 차지할 정도로 매우 중요한 Key Component이자, 고밀도화/고효율화/경량화를 위한 핵심 개발 품목이다. 전력모듈은 전력반도체 소자 및 패키징 소

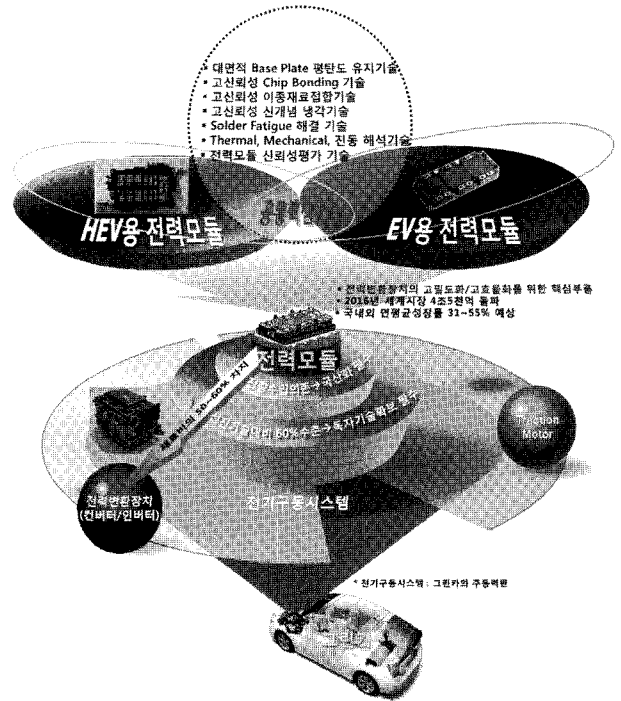


그림 3 주요 개발대상 품목 개요도

재의 모듈 집적화 설계기술, 제조공정기술, 특성시험 및 신뢰성 평가기술 등의 주요기술을 통해 구현되는 것으로, 특히 친환경 자동차인 그린카에 적용되는 전력모듈은 고온, 진동 등의 열악한 환경에서 동작하기 때문에 고 신뢰성이 매우 중요하다.

표 1 우리나라 그린카 핵심 부품 기술 로드맵

핵심기술	단기						중기	장기	연구개발 목표
	2009	2010	2011	2012	2013	2020			
고밀도 전력모듈 기술	◆ 전력모듈 기술개발						◆ 초고밀도/저손실 전력모듈 기술		지표: Power Cycle 목표치: 20,000회 예산: 100억원
고출력밀도 구동모터 기술	◆ 50kW급 고효율 구동모터 개발						◆ 지능형 전력모듈 기술개발		지표: 출력밀도 목표치: 1.8kW/kg 예산: 70억원
고효율 컨버터 기술	◆ 고밀도 확보 기술개발						◆ 고신뢰성 확보 기술개발		지표: 효율 목표치: 94% 예산: 80억원
고밀도 인버터 기술	◆ 고밀도 확보 기술개발						◆ 고신뢰성 확보 기술개발		지표: 전력밀도 목표치: 8kW/l 예산: 60억원

기술혁적 전략: ● 자체개발, ○ 국제공동개발, □ Outsourcing
기술도입: ● 자체개발, ○ 국제공동개발, □ Outsourcing
정책소재도: R&D
실용화 단계: 실용화 - 실용단계 - 기초연구

1.2 개발 필요성

저탄소 녹색성장시대에 부합하는 그린카는 에너지 자원의 무기화와 환경규제를 통한 시장 진입 장벽 구축에 대응하는 국내 자동차산업의 21세기 기술경쟁력을 결정짓는 미래 성장 동력이다. 2008년 8월 15일 정부는 신 국가 발전 패러다임으로 “저탄소 녹색성장”을 제시하면서, 주요내용으로 2020년에 3천조원에 달할 녹색기술 시장 선도국이 되겠다고 밝혔으며, 2020년 세계 4위의 “그린카” 강국 등의 구상을 발표하였다.

국내의 경우 일본 및 유럽에서 전량 수입하고 있는 실정으로, 국내 기반기술 부족에 따른 낮은 경쟁력과 저조한 국가 연구 프로젝트나 개발 활동 등은 시급히 개선될 필요가 있으며, 독자 기술 확보, 수입 대체, 관련기술의 타산업계 전이성 등을 고려할 때 국산화 기술개발이 절실한 품목이다.

2. 자동차 전력모듈 기술특성

2.1 기술성 분석

2.1.1 기술적 동향

(1) Hybrid차 및 전기차용 차세대 전력모듈 패키지 기술

전력모듈에 사용되는 소자로는 IGBT, MOSFET, GTO/Thyristor가 존재한다. 일반 산업용과 자동차 분야에서는 IGBT가 많이 채용되고 있으며, 그린카의 핵심 부품인 컨버터/인버터에는 높은 스위칭 주파수와 함께 대용량으로 인해 IGBT가 많이 사용되고 있다. 또한, 제한된 공간에 장착되는 차량 부품의 특성상 소형/경량화를 위한 IGBT 모듈형태로 사용되고 있다.

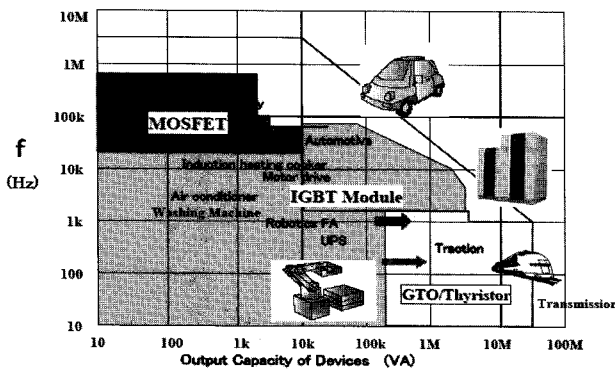


그림 4 일반 IGBT 응용 분야

전력모듈은 전력소자, DBC(Direct Bond Copper), Aluminum Wire, Base Plate, Molding Silicone, Case & Cover, Terminal 등과 같이 여러 복합 재질로 구성되며 아래에 각 파트에 대한 개요를 설명하였다.

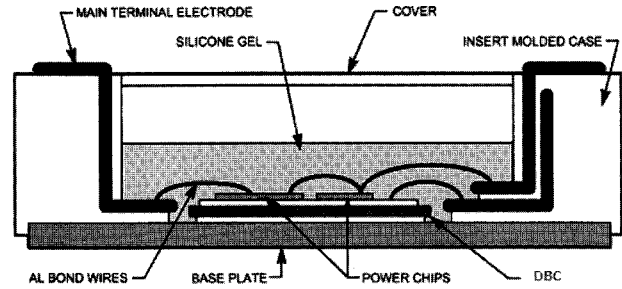


그림 5 Internal structure of Power Module

• 전력소자

전력소자인 IGBT와 FwDi는 Switching을 통해 전동기가 구동할 수 있는 출력을 제공하는데, 자동차용으로 사용되는 전력소자는 대개 175°C 이상의 Junction Temperature가 요구된다. 일본 등 선진업체의 전력반도체 모듈에 적용된 IGBT는 Conduction Loss와 Switching Loss를 저감시켜 손실을 줄인 Trench gate and Field stop technology가 적용되었고, 열 저항을 개선하도록 Thin wafer technology까지 적용되었음. FwDi는 Reverse recovery 특성을 개선한 소자나 SiC를 이용한 제품들이 적용되고 있다.

• DBC(Direct Bond Copper)

전력소자를 전기적으로 연결하며 IGBT/FwDi 동작시 발생하는 열을 외부로 전달하는 역할을 하는 파트로, 주로 열 성능과 절연 기능이 우수한 Al₂O₃의 세라믹 소재가 사용되며 AlN도 일부 Application에 사용되고 있다.

• Aluminum Wire

전력소자와 전력소자 사이, 전력소자와 DBC 사이, DBC와 DBC 사이의 전기적 연결을 하는 기능을 담당하며, Aluminum Wire의 접합 시에는 ultra sonic 기술로 상온에서 접합하게 되는데 이 접합 기술은 모듈의 신뢰성에 중요한 영향을 주므로 여러 파라미터를 고려하여야 한다.

• Base plate

전력소자에서 발생된 열을 외부로 전달하는 기능을 하며 Copper 및 AlSiC 등의 소재가 사용된다. 또한 고온과 저온의 온도차가 심한 자동차 환경에서는 소재의 CTE(Coefficient of Thermal Expansion)를 고려해야 한다.

• Molding silicone

내환경 및 절연 기능이 있어야 하며, silicone은 액상에서 고온 소성을 통해 Gel 형태로 되며 Case와의 접합 특성 및 오일의 정재도, 발화성 등을 고려해야 한다.

· Case & Cover

외부로부터 모듈 내부를 보호하며 Terminal Electrode의 지지 역할을 담당하는 것으로, 고온의 플라스틱 사출을 통해 형태를 갖추고 전력반도체 모듈 제조 공정상 고온 접합/소성 공정이 있으므로 변형, 발화, Silicone과의 접합 특성 등을 고려해야 한다.

전력모듈에 있어서 세계 시장의 동향은 친환경적인 100% Solder Free를 구현함과 동시에 Electrical, Thermal, Mechanical 및 Environmental 측면에서 고 신뢰성 확보를 위한 공정 및 조립기술의 개발이 진행되고 있으며, 그 선두에 서있는 것이 SEMIKRON의 100% Solder Free 파워 모듈임. 일본 미쯔비시의 경우에는 기 Solder 방식을 택하면서도 고 신뢰성의 제품을 개발하기 위해 각 공정의 최적화를 추구하고 있다.

전력모듈에 사용되는 IGBT는 1990년대 초에는 효율 증대와 신뢰성 증대를 위한 노력이 주가 되었으며 주로 사용영역은 산업용 인버터에 활용이 되었으며, 하나의 Leg만을 구성하는 2-Pack 형태가 주 생산품이었다. 90년도 중반부터 6-pack의 제품이 일반화 되었으며, 점차 Gate drive, Protection circuit, 전류 측정 등의 다양한 기능들을 포함한 제품들이 시장에 선을 보이게 되었으나, 대부분의 제품들은 그린카와 같은 차량에 사용되기에는 내환경이 부족하였으며, 차량용 전력모듈의 경우 각 전력모듈 회사와 자동차 회사에서

독자적인 제품을 출시하고 타사와는 공유하지 않은 배타적인 기술 환경을 구축하는 상황이다.

전력모듈의 기술 진행은 Trench 구조가 개발되면서 토요타 및 혼다의 초기 하이브리드 차량에 사용되던 Planar 구조의 전력모듈에 비해 열 배출 능력, 효율, 사이즈 측면에서 급격한 기술 진보를 이루었으며, 현재의 선진 자동차 기업의 하이브리드차량은 현재 Trench 구조의 전력모듈로 전량 교체되어 적용되고 있다.

그린카용 전력모듈은 고온/저온의 온도변화와 진동에 대한 내환경 특성 및 내습, 전기적 충격 등에 강인하여야 하므로, 무엇보다도 고신뢰성을 필요로 한다. Semikron에서는 최근 접합 방식 개선을 통해 Temperature cycle capability를 크게 향상시켰으며, 기존의

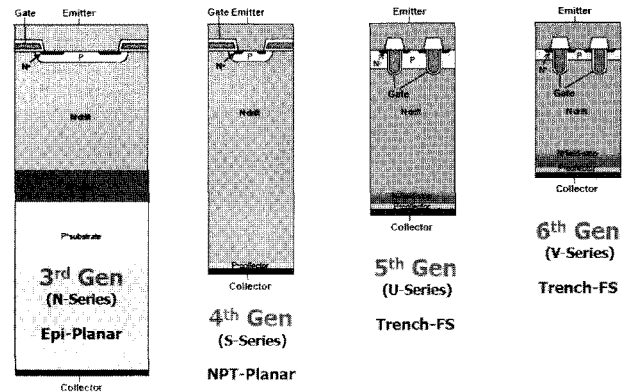


그림 7 Technology progress of IGBT chip

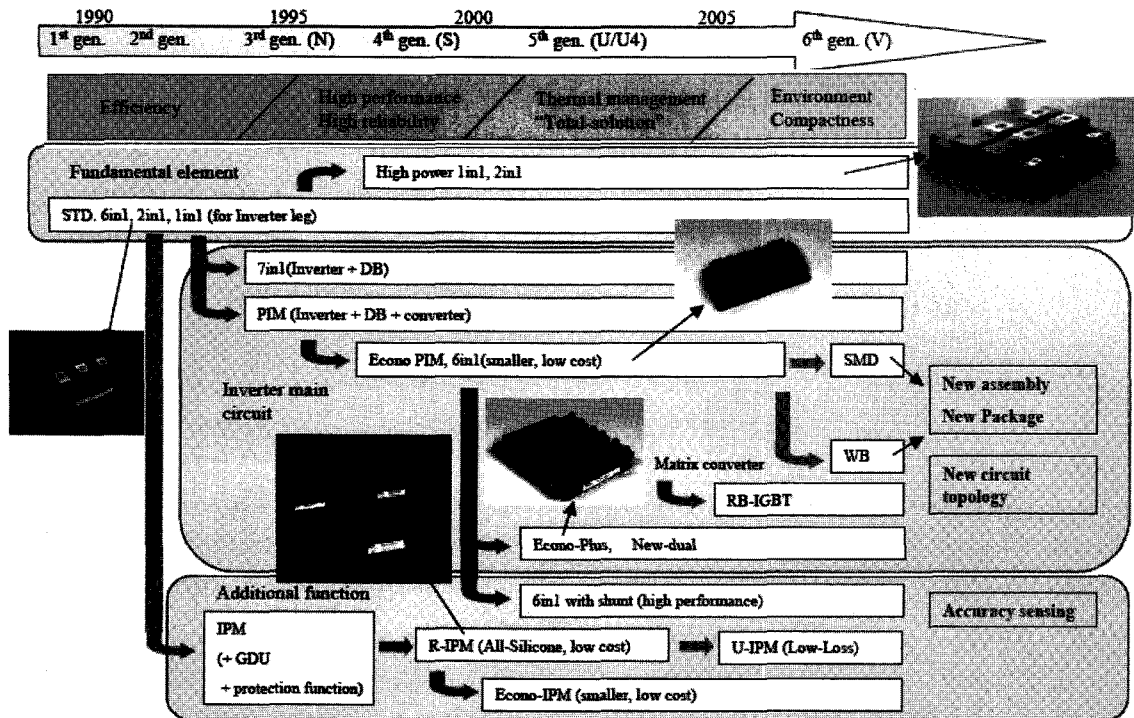
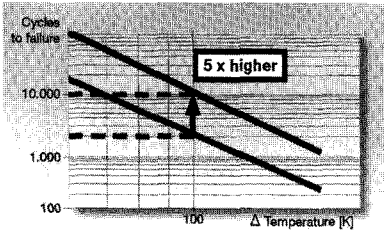


그림 6 Products road map of IGBT module



- SKIM**
- no base plate
 - solder free contacts
- Soldered module**
- soldered base plate
 - soldered contacts

그림 8 Temperature Cycling capability of Semikron

100% solder-free contacts

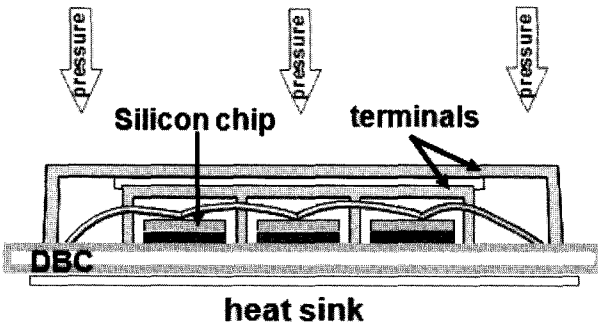


그림 9 Soldered contacts and Solder free contacts of Semikron

Soldered contact 방식을 변경하여 Solder free contact 방식인 Pressure contact 기술을 적용하여 자동차의 환경에 적합한 신뢰성을 확보하였다.

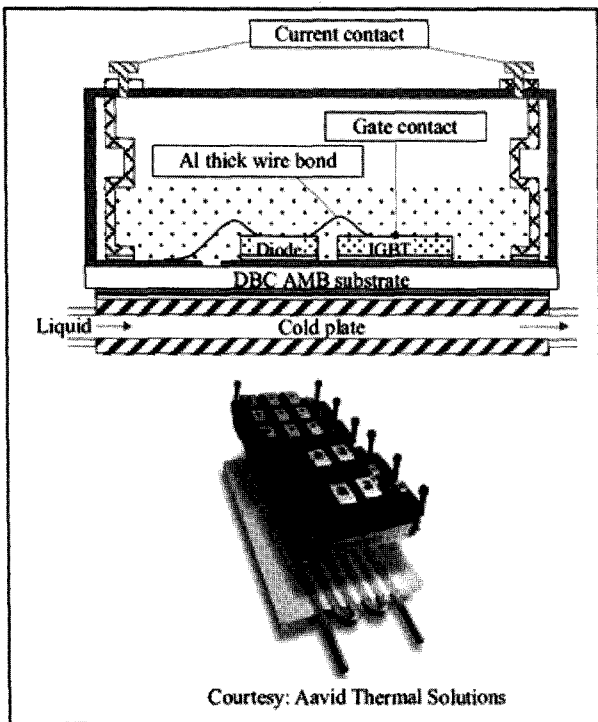


그림 10 Liquid cooled heat sink

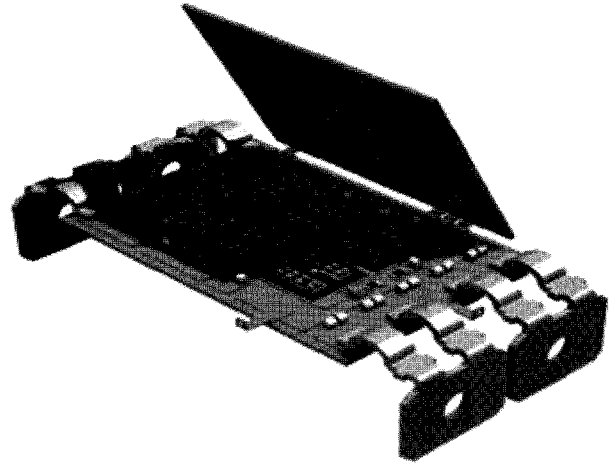


그림 11 Double side cooled back to back module

자동차 특성상 고온 상태와 한정된 공간에 위치해야 하는 전력모듈의 방열구조에 있어서도 기존의 공랭식에서 수냉식으로 전환된 다양한 방식의 개발이 진행되고 있으며, 한 쪽 방향으로만 방열을 하였던 구조에서 전력소자의 상/하 모두를 방열할 수 있는 double side cooled back to back 형태도 개발된 사례가 있다.

혼다의 경우 Soft type HEV에 적용하는 전력모듈을 성능보다는 가격저감을 목적으로 다소 내구성은 떨어지나 가격이 저렴한 재질을 사용하여 인버터 사용량을 줄여 내구특성을 만족시키는 방향으로 기술개발을 전개해 나가고 있다. 이전모델보다 정력용량을 줄임으로서 Thermal cycle을 많이 감소시켰으며 EMC 몰딩재질을 사용하여 원가를 대폭 절감하였다.

도요타의 경우 Hard type HEV에 적용하는 전력모듈을 가격보다는 성능 및 연비 향상에 비중을 두고, 출력밀도를 높이는 방향으로 기술개발을 전개하고 있

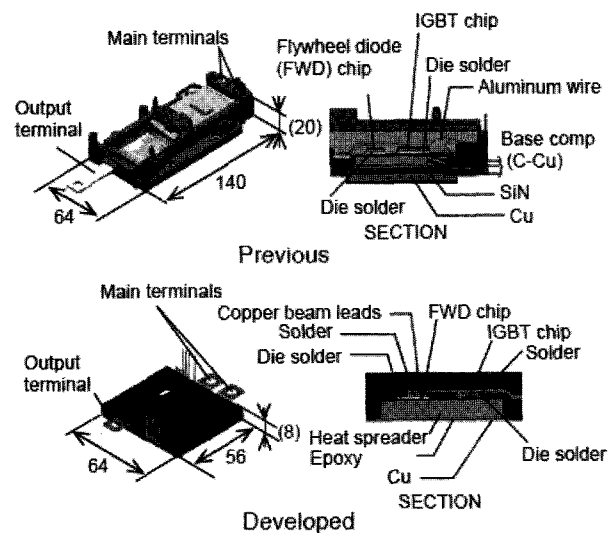


그림 12 신형 전력모듈(혼다)

다. 열전도도가 구리보다 다소 떨어지는 알루미늄 소재를 사용하였으나, 전력소자와 냉각핀을 일체형으로 만들고 직접냉각방식을 적용하여 냉각성을 극대화 하였으며, 출력밀도를 높임과 동시에 가벼운 알루미늄 소재로 무게가 크게 가벼워진다. 또한, 프리우스 2 세대에 적용된 모터/발전기용 12 스위치 모듈과 컨버터용 2 스위치 모듈을 프리우스 3세대에는 모터/발전기용 12 스위치 모듈의 동일사이즈에 14 스위치, One-PACK으로 구성하여 고밀도화 및 경량화를 달성하였다.

국내의 전력모듈 분야의 회사는 LS산전, 페어차일드, 다원전자 등에서 산업용 600V 200A급 6-PACK 수준의 기술을 확보하고 있으며, 자동차용에서 요구하는 Solder-Free 및 고 Thermal/Electrical/Mechanical/Environmental 신뢰성의 제품에는 핵심 원천 기술이 매우 취약한 상태이다. 최근 국내 L사와 S사 등의 대기업군에서 그린카용 전력모듈에 큰 관심을 가지고, 기술개발을 일부 진행하고 있으나, 상용화된 사례는 없으며, 일본 등 선진기업의 기술수준에 크게 뒤쳐져 있는 실정이다.

Direct Cooling

The 3rd Generation Power Module Structure

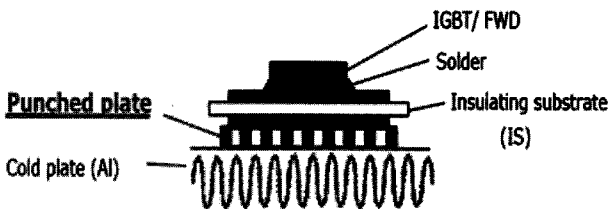


그림 13 직접냉각방식(도요타 프리우스 3세대 적용)

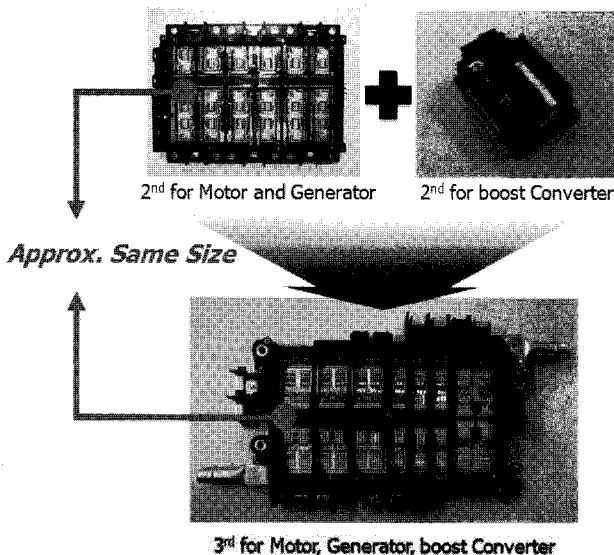


그림 14 프리우스 2세대, 3세대 전력모듈 비교

(2) Hybrid차 및 전기차용 차세대 전력모듈 평가 기반기술

전력모듈 평가 기반기술은 그린카용 전력반도체 모듈이 차량에 사용되었을 때의 환경을 모사하여 그 신뢰성을 평가하는 기술로서, 모듈 단위의 신뢰성 평가, 인버터 단위평가, 실차 조건 평가로 크게 3부분으로 구성되어 있다.

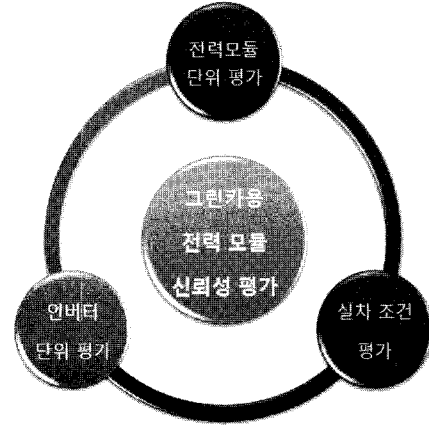


그림 15 그린카용 전력모듈 평가 기술 구성도

· 모듈 단위의 신뢰성 평가

모듈 단위의 신뢰성 평가는 모듈 개발 이후 초기에 진행하는 가장 기본적인 평가로, 내환경성 평가와 수명 예측 평가로 구성된다. 내환경성 평가는 여러 조건에서의 온도, 습도, 진동에 대한 전력 모듈의 신뢰성을 평가하는 것으로 다양한 환경에서 사용되는 차량용용 영역에서는 중요한 신뢰성 평가이다. 또한, 차량의 수명에 상응하는 전력모듈의 수명이 확보 되어야 하므로, 수명을 예측하기 위한 신뢰성 평가도 중요하다.

· 인버터 단위평가

인버터 단위평가는 모듈 단위에서의 신뢰성 평가를 확인 후 인버터에 적용하기 위한 평가로, 모듈단위의 평가와 실차조건에서의 평가 사이에 인버터 형태로 구성되었을 때의 문제점을 미리 파악하는 평가로, 다양한 환경에서의 전력모듈의 안정성 평가로 주로 이루어져 있다. 모듈 단위 평가에서는 모듈에 열을 전달하기 위한 방열판과 기타 주변 부품들을 이상적으로 해서 모듈만의 평가를 하게 되므로, 실제 인버터 환경에서의 평가가 필요하므로 이와 같은 인버터 단위평가를 진행하게 된다. 인버터 단위 평가에서는 차량에 탑재되는 크기의 방열판, 방열구조, 주변회로를 가지는 장치로 전력모듈의 방열 성능과 주변 환경에 대한 내환경성을 평가하게 된다.



· 실차조건 평가

신뢰성 평가의 마지막 단계로 실차조건 평가는 차량에 탑재되는 실차 인버터에 전력모듈을 삽입하여, 실제 차량의 운전조건에서 평가를 진행하는 것으로 오르막, 내리막, 급정거, 급출발 등의 실제 차량환경에서 전력모듈 및 실차 인버터와의 연계특성을 평가하는 것으로 가장 많은 시간/자원 투입을 요하는 중요한 시험 항목이다.

그린카용 전력모듈 평가 기준은 해외 선진기업에서도 표준화되어 있지 않고 자사의 방대한 시험 데이터를 바탕으로 평가를 하고 있는 상황으로, 각 기업에서는 대표적으로 Thermal Cycle, Power Cycle, Vibration에 대한 성능 지표만을 발표하고 있다. 이외의 성능지표에 대한 자료는 내부적으로 대외비로 관리되어 외부에 알려져 있지 않은 실정이다.

국내의 경우 전력 모듈 평가 인프라가 대기업과 중소기업, 연구원에서 일부 구축 되어 있으나, 모두 산업용에 국한되어 있으며 차량용 전력 모듈에 대한 평가 기술은 많이 부족한 상태이다. 산업용을 위한 평가 기술 및 인프라는 그린카용 대용량 전력 모듈에 비해 용량이 부족하며, 환경을 모사할 수 있는 영역이 좁아 현재의 국내 평가 기술 및 인프라로는 시험 평가가 불가능한 상황이다.

또한, 국내 자동차 기업 중 유일하게 하이브리드 자동차를 양산중인 현대자동차에서도 전력 모듈을 전량 수입해 오고 있으며, 시험 평가 기준의 정립이 아직 확립되어 있지 않은 실정으로 평가기준안의 마련이 시급하다.

3. 결론

국내 기업의 전력모듈은 용접기 등 대부분 산업용에 적용되는 제품라인을 갖추고 있으며, Solder를 기본 결합 물질로 사용하고, Package 형태도 2-Switch 모듈(600V 400A 이하)에 한정되고 있는 실정으로, 이를 자동차에 적용하기에는 내환경성/신뢰성 성능이 적합하지 않다. 특히, Thermal cycle의 경우는 200회, Power Cycle의 경우는 10,000회 정도의 신뢰성 수준이며, 진동시험은 전무한 상태로서, 본 과제를 통해 신뢰성조건이 가장 열악한 그린카용 전력모듈 기술개발에 성

공한다면 자동차 산업뿐만 아니라 타 산업계로의 기술적 파급효과는 매우 클 것으로 판단된다.

2016년 그린카용 전력모듈의 세계시장규모는 4조 5천억원 규모로 증가할 전망이며, 국내외 연평균 성장률은 31~55%로 급격히 증가될 것으로 예상되는데, 그린카용 전력모듈의 국산화는 경제적 파급효과가 매우 큰 부품이다.

그린카용 전력모듈은 현재 전량 수입에 의존하고 있는 100% 대외의존성 부품으로서, 본 과제를 통해 국산화를 달성한다면 전량수입구조 및 무역 역조 개선을 기대해 볼 수 있으며, 나아가 세계 그린카 4대 강국의 진입에 이바지 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] IMS Research 2009, Global Insight 2010, HIEDGE 2009.
- [2] The Hydrogen Economy : Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, The National Academies, 2008.
- [3] FreedomCAR&Fuel Partnership, Electrical and Electronics Technical Team Roadmap, 2006.

약 력



김 병 우

1987 한양대학교 기계공학과 졸업
 1990 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사)
 2002 한양대학교 정밀기계공학과(박사)
 1989 일본 KOSAKA 연구소 초빙연구원
 1994~2006 자동차부품연구원 전장기술연구센터장

2006~ 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수
 E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr



허 진

1999 공학박사, 한양대(전기공학)
 1999~2000 Texas A&M Univ. Post doc. Research Associate
 2000~2001 한양대 연구교수
 2002~2008 전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터장

2008~ 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 조교수
 2004~ 현재 IEEE Senior member
 2006~ 현재 Associate Editor, IEEE Trans. on Power Electronics
 2008~ 현재 Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology
 2008~ 현재 IEEE Intelec 2009 Publication Chair
 E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr